In the name of Allah, the Most Gracious, the Most Merciful













Atténuation

1. Généralités.

Lorsqu'un faisceau de **rayons X** ou **γ** pénètre dans un milieu matériel, on constate une diminution progressive de son intensité. Cette diminution du nombre de photons, ***l'atténuation du faisceau,*** *est due essentiellement à l'interaction* ***des photons avec les*** **électrons (ionisations ou excitations).**

Dans un tel processus, l'énergie perdue se retrouve sous deux formes:

- **une partie de l'énergie est absorbée par le milieu**,
- **et une autre partie est diffusée et sort de la matière dans une direction différente de la direction du faisceau initial.**

Les phénomènes d'atténuation et d'absorption sont à l'origine des applications et des effets des **rayons X** en **radiodiagnostic** et en **radiothérapie**.

2. Étude du phénomène global:

2.1 Loi d'atténuation.

Soit une cible d'épaisseur **x**, **bombardée** par un nombre initiale N_0 de photons **X ou γ** monochromatique tombant **normalement** sur la surface de la cible.

N_0 N x

$$N = N_0 e^{-\mu \times x}$$

Avec: N_0: nombre initial de photon incidents.
N : nombre final de photon sortant de la cible.
x : épaisseur de la cible.
µ : **coefficient linéaire d'atténuation, il dépend de l'énergie incidente ainsi que de la nature de la matière cible son unité est le cm^{-1}.**

2.1 Couche de demi atténuation

Elle représente **l'épaisseur** de matière qui **réduit de moitié** l'intensité du faisceau incident.

Pour x=CDA ; alors $$N = \frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\mu \times CDA}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\mu \times CDA} \Rightarrow CDA = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

A la différence de comportement des particules chargées, les rayons X et γ perdent progressivement leur énergie et sont arrêtés au bout d'une distance donnée, les rayons X ou γ ne peuvent qu'être atténués (loi exponentielle).

Dans le cas d'une utilisation des photons γ en radiothérapie, ceux-ci peuvent s'avérer peu adaptés car l'énergie déposée le long de leur parcours cause des dommages sur les tissus environnant la région lésée.

Remarque. Si l'on remplace dans l'expression de **N** la constante μ, on retrouve une expression:

$$x = n \times CDA \qquad \mu = \frac{\ln(2)}{CDA}$$

$$N = N_0 \times e^{-\frac{\ln(2)}{CDA} \times n \times CDA} = \frac{N_0}{2^n}$$

2.2 coefficient massique d'atténuation:

Généralement, on considère un matériau par son **coefficient massique d'atténuation μ_m** souvent mesurée en **$cm^2.g^{-1}$**, et l'épaisseur de matériau absorbant appelé **masse surfacique m_s** mesuré en **$g.cm^{-2}$**.

Cette masse surfacique représente la quantité de matière par unité de surface que le rayonnement rencontre sur son chemin.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}\left(\frac{cm^2}{gr}\right) \qquad m_s = \rho \times x\left(\frac{g}{cm^2}\right)$$

$$N = N_0 \times e^{-\frac{\mu}{\rho} \times \rho \times x} = N_0 \times e^{-\mu_m \times m_s}$$

remarque: Pour les tissus vivants pratiquement assimilables à l'eau, les courbes sont très proches de l'aluminium.

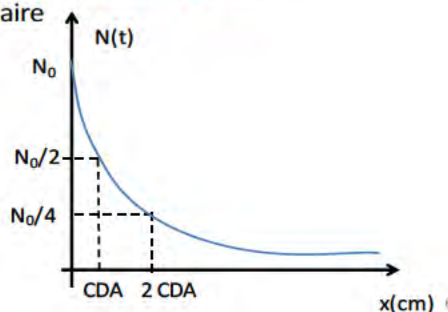
2.3 Libre parcours moyen.

Le libre parcours moyen du photon est la distance moyenne que peut franchir le rayonnement d'énergie initiale **E_0** avant d'être arrêtée dans le milieu. Cette distance est : **x=1/μ**

$$N = N_0 \times e^{-\mu \times \frac{1}{\mu}} = N_0 \times e^{-1} = \frac{N_0}{e}$$

2.4 Graphe donnant l'atténuation en fonction de x.

Le graphe de l'atténuation est similaire de celui de la radioactivité



3. Différents processus d'atténuation.

3.1 introduction

L'atténuation *du faisceau, est due essentiellement à l'interaction des photons incidents avec les* électrons de la matière cible. Dans un tel processus, l'énergie perdue se retrouve sous deux formes:

- une partie E_A est absorbée par le milieu,
- une autre partie E_D est diffusée et ressort de la matière dans une direction différente de la direction du faisceau initial.

Les phénomènes d'atténuation et d'absorption sont à l'origine des applications des effets des rayons **X** en **radiodiagnostic** et en **radiothérapie**.

Cette atténuation de photons, **X ou** γ traversant le matériau, est le résultat de trois processus d'interaction :

a) effet photoélectrique
b) diffusion Compton
c) production de paires

3.2 Coefficient D'atténuation Global.

Le transfert d'énergie est soit **complet** (absorption) soit **partiel** et là on parle de diffusion du rayonnement incident.

Pour des rayonnements d'énergie donné et pour un matériau donné, le **coefficient linéaire d'atténuation** peut se mettre sous la forme de la somme des trois effet.

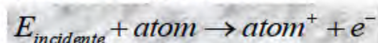
$$\mu = \tau + \sigma + \varepsilon$$

μ: est le coefficient d'atténuation global.
τ: coefficient d'atténuation par effet photoélectrique.
σ: est le coefficient d'atténuation par effet Compton.
ε: est le coefficient d'atténuation par production de paire.

3.3 L'effet photoélectrique.

3.3.1 description du processus

Dans le processus de l'effet photoélectrique, le photon incident interagit avec la matière et disparaît, un « photoélectron » apparait éjecté par l'atome d'une de ses couches atomiques. **Absorption complète de l'énergie incidente:**

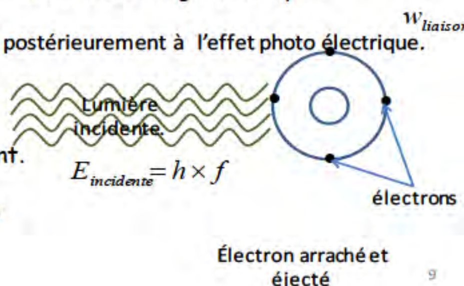


$$E_{incidente} + atom \rightarrow atom^{+} + e^{-}$$

En plus du photoélectron, l'interaction crée un atome ionisé avec vacance de site qui sera comblée ultérieurement par un électron libre d'une autre couche.

Pour des rayons incident d'énergie suffisante, c'est l'électron d'une couche K qui est éjecté. Le photoélectron apparaît avec une énergie cinétique.

Par conséquent des rayons X sont générés postérieurement à l'effet photo électrique.



$E_{ncidente}$ est l'énergie du photon incident.

$w_{liaison}$: énergie de liaison de l'électron dans sa couche originelle

3.3.2 conservation d'énergie.

Dans le processus de l'effet photoélectrique: le photon entre en collision avec un électron des couches internes de l'atome. L'énergie $\mathbf{E_{incidente}}$ du photon incident est transférée à l'électron qui est **éjecté** de sa couche.

Une partie de cette énergie est utilisée pour "extraire" l'électron interne (énergie de liaison $\mathbf{W_{liaison}}$), l'excédent d'énergie se retrouve sous forme d'énergie cinétique $\mathbf{E_{cinétique}}$ de l'électron éjecté.

L'effet photoélectrique ne peut avoir lieu que si l'énergie du photon incident est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron. L'énergie cinétique du photoélectron est finalement transférée au milieu lors d'ionisations ultérieures.

Le retour de l'atome à l'état fondamental s'accompagne d'une émission d'énergie sous forme d'un photon de fluorescence ou d'un électron Auger.

Pour des rayons incident d'énergie suffisante, c'est l'électron d'une couche K qui est éjecté. Le photoélectron apparaît avec une énergie :

$$E_{incidente} = w_{liaison} + Ec_{electron} \qquad Ec_{electron} = h \times f - w_{liaison}$$

3.3.3 Remarques.

- Pour que l'électron soit arraché de sa case quantique, il faudrait un minimum d'énergie incidente appelée seuil d'excitabilité, ou seuil photoélectrique. Dans ce cas l'électron est arraché sans vitesse initiale.
- La probabilité d'interaction par effet photoélectrique est très grande si l'énergie du photon incident est proche de l'énergie de liaison de l'électron cible.
- la conséquence directe de l'effet photoélectrique est l'émission de rayons X, due aux transitions électroniques.
- Si le photon émis lors de la transition électronique arrache un électron des couches externes, cet électron arraché est dit Auger.
- La probabilité d'avoir des électrons Auger est très grande pour les éléments de faible Z.
- les électrons crées par effet photoélectrique sont par conséquent émis en spectre de raies spécifiques du matériau absorbant.
- L'effet photoélectrique prédomine aux faibles énergies.

11

3.4 Effet Compton

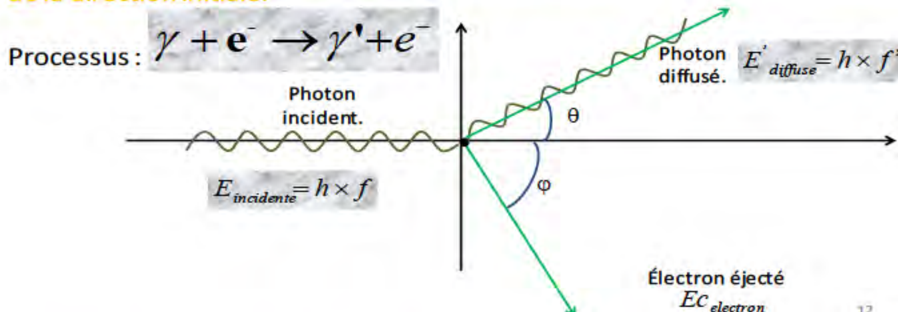
3.4.1 description du processus.

Le photon incident de grande énergie (**X ou γ**) entre en collision avec un électron libre ou faiblement lié de la matière cible auquel il cède une partie de son énergie.

Si l'énergie de liaison de l'électron cible est très faible devant l'énergie du photon incident, on peut considérer que l'électron cible est libre :

Un photon d'énergie plus faible est diffusé dans une direction différente de la direction initiale.

Processus : $\gamma + e^- \rightarrow \gamma' + e^-$



12

3.4.2 conservation d'énergie.

La conservation de l'énergie du système avant et après le choc, donne :

$$E_0^{e^-} + E = E_t^{e^-} + E'$$

Avec: $E_0^e = m_0c^2$: est l'énergie au repos de l'électron cible.
$E_t^e = mc^2$: est l'énergie totale de l'électron éjecté.
$E = h.f$: est l'énergie du photon incident.
$E = h.f'$: est l'énergie du photon diffusé.

3.4.3 conservation de la quantité de mouvement.

La conservation de la quantité de mouvement du système avant et après le choc, donne :

$$\vec{p}_{\varphi} = \vec{p}_{\varphi'} + \vec{p}_{elec}$$

Avec: $|\vec{p}|_{\varphi} = \frac{E}{C}$: est la quantité de mouvement du photon incident.

$|\vec{p}|_{\varphi'} = \frac{E'}{C}$: est la quantité de mouvement du photon diffusé.

$\vec{p}_{elec} = m_{e^-}\vec{v}_e$: est la quantité de mouvement de l'électron éjecté.

3.4.3.1 Énergie des photons diffusés

Des deux équations de conservation précédentes on peut montrer que:

$$E' = \frac{m_0c^2.E}{m_0c^2 + E(1-\cos\theta)} \qquad E' = \frac{E}{1+\frac{E}{m_0c^2}(1-\cos\theta)}$$

La longueur d'onde du rayonnement diffusé est :

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0c}(1-\cos\theta)$$

λ : Longueur d'onde du photon incident, λ' est celle du photon diffusé

h/m_0c = λ_C Longueur d'onde Compton = 0.0243 A

Si **E** est l'énergie incidente, **E'** du photon diffusé est :

L'énergie cinétique **E**c acquise par l'électron au cours du choc est

$$E_c^{e^-} = E - E'$$

3.4.3.2 Énergie cinétique des électrons éjectés

$$E_C^{e^-} = \frac{E^2(1-\cos\theta)}{m_0c^2 + E(1-\cos\theta)}$$

L'énergie prise par l'électron est maximale lorsque celle du photon diffusé est minimale :

$$\theta = \pi; \quad E' = \frac{m_0c^2.E}{m_0c^2 + 2E}$$

donc l'énergie cinétique devient :

$$E_C^{e^-} = \frac{2E^2}{m_0c^2 + 2E}$$

3.4.4 Remarques.

- Si l'angle **θ=π Δλ = 2.λ$_c$**, on dit que le déplacement Compton est maximal. La collision est frontale. Le photon diffusé se déplace dans une direction opposé à celle de l'électron.
- Si l'angle **θ=π/2 Δλ = λ$_c$**, La collision est tangentielle.
- La probabilité d'interaction par effet Compton augmente avec l'énergie du photon incident .
- Le coefficient massique d'atténuation par effet Compton est indépendant de la nature de la substance.
- L'effet Compton n'est pas un phénomène d'absorption vrai.

3.5.3 Remarques:

- la réalisation de la production de paire exige une énergie relativement faible, le minimum est de 2 m_0c^2 = 1,022 M.e.V

- La distribution des énergies cinétiques entre les deux particules émises dépend de l'énergie initiale du photon incident.

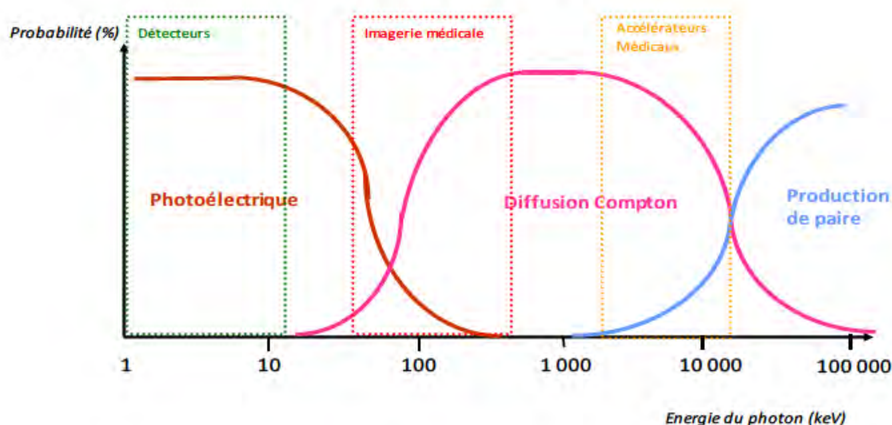
- Au faible énergies le rapport des énergies cinétiques des deux particules émises est très proche de un.

- La particule β^- cède sont énergie cinétique par excitation et ionisation des atomes de la matière traversée, en fin de parcours il se trouve à l'état libre.

- La particule β^+ très instable va s'associée à un électron libre pour donner naissance à deux photons de même énergie 0,511 M.e.V

- La production de paire n'est pas un phénomène d'absorption vraie.

La probabilité de l'interaction varie avec l'énergie du photon.



4. Domaine de prépondérance de chacun de ces effets

La probabilité d'interaction par effet Compton est à peu prés indépendante du numéro atomique de la cible. En revanche, celles par effet photoélectrique et production de paires lui sont proportionnelles.

Ainsi, dans les applications usuelles des rayons X et des radionucléides émetteurs γ (dont les énergies se situent entre 50 KeV et quelques MeV) l'effet Compton est prédominant.

Donc le domaine d'énergie dans lequel l'effet Compton est dominant est d'autant plus important que le numéro atomique de la cible est plus faible.



Exposition des mains d'un chercheur dans le faisceau d'un accélérateur de particules.



Contact cutané avec du cobalt 60

DOSES AUTORISEES

PERSONNEL EXPOSE	PERSONNEL NON EXPOSE
 5 cGy/an	**0,1 cGy/an**